

## ОТЗЫВ

### официального оппонента

на диссертационную работу ТИМОФЕЕВА Игоря Валериевича «Генерация терагерцового излучения при коллективных взаимодействиях электронных и лазерных пучков с плазмой» представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 — «Физика плазмы»

Диссертационная работа И.В. Тимофеева посвящена теоретическому изучению механизмов генерации электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне частот при воздействии на плазму электронными и лазерными пучками. Существующие источники терагерцового излучения существенно уступают по мощности и полной энергии импульса источникам в соседних инфракрасном и СВЧ диапазонах, так что в литературе терагерцовый диапазон частот часто именуется “терагерцовым провалом”. Последние 25 лет этот провал активно заполнялся как с помощью методов вакуумной электроники (лазеры на свободных электронах, ТГц гиротроны), так и благодаря различным схемам конверсии в низкие частоты энергии мощных лазерных импульсов в нелинейных кристаллах (оптическое выпрямление, генерация на разности частот двух оптических лазеров). В данной диссертации существенное продвижение по мощности терагерцового излучения предлагается достичь за счёт использования коллективного взаимодействия слаборелятивистских килоамперных электронных пучков с плазмой. Такие пучки могут весьма эффективно отдавать свою энергию плазменным колебаниям, а их энергозапас существенно превышает энергию современных лазерных систем. Кроме того, плазма как нелинейная среда не имеет порогов разрушения и способна поддерживать высокие напряжённости электрических полей. Процессы взаимодействия мультигигаваттных электронных пучков с плазмой длительное время изучались на установке ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН) как способ нагрева термоядерной плазмы, и только недавно подобная пучково-плазменная система стала рассматриваться как перспективный источник перестраиваемого по частоте терагерцового излучения гигаваттного уровня мощности. Создание такого источника сегодня востребовано как в фундаментальной науке, связанной с манипуляцией различными степенями свободы в твёрдом теле, так и в таких прикладных областях как медицина, безопасность и локация высокого разрешения. Таким образом, изучение процессов электромагнитной эмиссии из плазмы в условиях установки ГОЛ-3, интерпретация результатов проводимых там экспериментов и поиск способов увеличения эффективности генерации излучения в такой системе стоит признать весьма **актуальной** и интересной задачей.

В диссертации получены следующие **новые результаты**.

1. Решена задача вычисления инкремента неустойчивости горячего релятивистского электронного пучка в горячей плазме при произвольных значениях магнитного поля.
2. Исследованы процессы нелинейной стабилизации неустойчивых мод за счёт захвата частиц пучка и влияние на них ведущего магнитного поля.
3. Исследованы особенности развития модуляционной неустойчивости ленгмюровской волны в сильнонеравновесной плазме с хвостом надтепловых электронов.
4. Построена теоретическая модель генерации электромагнитного излучения в окрестности удвоенной плазменной частоты в сильнотурбулентной плазме и получено согласие предсказаний этой теории с результатами экспериментов на установке ГОЛ-3.
5. Предложены новые схемы эффективной генерации терагерцового излучения при инжекции электронного пучка в плазму с продольной модуляцией плотности (плазменная антенна) и за счёт трёхволнового взаимодействия самых неустойчивых плазменных колебаний в системе встречных электронных пучков.
6. Предложен новый способ генерации когерентного терагерцового излучения с узкой спектральной линией за счёт нелинейного взаимодействия встречных кильватерных волн, возбуждаемых в плазме парой фемтосекундных лазерных импульсов.

**Достоверность** полученных результатов обосновывается согласием предложенных теоретических моделей с результатами численного моделирования методом частиц в ячейках и данными лабораторных экспериментов. Результаты работы опубликованы в высокорейтинговых научных журналах и докладывались на российских и международных конференциях.

**Личный вклад** И.В.Тимофеева является определяющим, а основные теоретические результаты получены автором лично, что отражено в соответствующих публикациях.

**Научная и практическая ценность** проведённых исследований состоит в том, что обнаруженные в работе новые механизмы генерации электромагнитного излучения можно использовать для создания относительно компактных и перестраиваемых по частоте терагерцовых источников. При использовании лазерных систем петаваттного класса появляется возможность достижения рекордных значений мощности и энергии в ТГц импульсе (до 1 ГВт и десятков мДж). В связи с высокой (до 10%) эффективностью генерации излучения на плазменной частоте, которая может достигаться в тонкой пучково-плазменной системе, интересные перспективы открываются для наносекундных килоамперных электронных пучков

с малым эммитансом, способных при токе в несколько кА сжиматься в миллиметровые размеры.

## Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

**Первая глава** посвящена линейному анализу пучковой неустойчивости. Поскольку автора интересовали эксперименты на установке ГОЛ-3, где пучок достигает релятивистских энергий и имеет большой разброс по поперечным импульсам, а плазма в процессе нагрева “отрацивает” интенсивный хвост надтепловых электронов и удерживается сильным магнитным полем, задача вычисления инкремента была поставлена в наиболее общем виде с учётом релятивистских, кинетических и магнитных эффектов. Соответствующее дисперсионное уравнение содержит медленно сходящиеся ряды бесселевых функций и в таком виде никогда не решалось. В данной диссертационной работе это уравнение удалось решить благодаря новому представлению диэлектрического тензора, в котором ряды с бесконечным числом членов удалось заменить на интеграл с конечными пределами по гироорбите электрона. Полученное решение показало, что при максвелловском характере распределения плазменных электронов наличие теплового разброса в плазме приводит к стабилизации только косых волн, а при наличии медленно спадающего надтеплового хвоста ещё и к значительному уменьшению инкремента самой неустойчивой продольной моды. Кроме того, сам факт преобладания продольной неустойчивости при релятивистских энергиях пучка на установке ГОЛ-3 не являлся заранее очевидным.

**Во второй главе** сформулирована феноменологическая модель спектра сильной турбулентности верхнегибридных колебаний, в которой предполагается, что нелинейное насыщение резонансных с пучком волн обусловлено захватом пучка. Под захватом пучка здесь понимается его регулярная нелинейная динамика в поле возбуждаемых колебаний, что требует либо монохроматичности доминирующей резонансной волны, либо корреляции между различными модами при возбуждении широкого неустойчивого спектра. Чтобы доказать наличие эффектов захвата не только в идеализированном одномерном случае, но и в условиях нарастания широкого спектра косых неустойчивых колебаний, в первой части главы проведены двумерные расчёты методом частиц в ячейке. Показано, что нелинейное взаимодействие между модами через общие захваченные частицы зависит от магнитного поля и всегда способствует появлению захвата. Полученные в модели выражения для энергии турбулентности и её локализации в пространстве волновых чисел дали правильную оценку для времени коротких вспышек излучения, которые должны появляться при коллапсе каверн. Однако невыясненным остался вопрос, как такое согласие могло быть достигнуто, если в модели характерный инкремент модуляционной неустойчивости оценивался в предположении максвелловского распределения плазменных электронов, а в эксперименте большая часть

кинетической энергии электронов сосредоточена в надтепловых хвостах. Для ответа на этот вопрос в третьей части главы проводится анализ влияния надтепловых электронов на развитие модуляционной неустойчивости ленгмюровской волны. Показано, что инкремент этой неустойчивости определяется температурой ядра распределения и совпадает с тем значением, которое получается в максвелловской плазме с такой же температурой.

**В третьей главе** по заданному спектру верхнегибридных колебаний проведены расчёты мощности электромагнитного излучения, возникающего за счёт их слияния в электромагнитную волну. Показано согласие не только в уровне мощности, но и в поляризации суб-терагерцового излучения, наблюдаемого в экспериментах на ГОЛ-3. На основе предложенной теории получены оценки для максимальной мощности электромагнитной эмиссии, которая может достигаться для имеющихся пучков в терагерцовом диапазоне частот.

**Четвёртая глава** посвящена изучению способов увеличения эффективности генерации излучения в система плазма-электронный пучок. Среди возможных схем обсуждается линейная конверсия самых неустойчивых пучковых мод на макроскопических градиентах плотности плазмы, переход в режим тонкого пучка (сопоставимого по размерам с длиной волны излучения), при котором система излучает на плазменной частоте как дипольная антенна, а также трёхволновое взаимодействие доминирующих резонансных волн в системе встречных пучков, приводящее к эмиссии вблизи удвоенной плазменной частоты. Наибольшее внимание в этой главе уделено механизму плазменной антенны, поскольку он характеризуется высокой эффективностью конверсии мощности пучка в мощность излучения (до 5-10%) и является наиболее вероятной причиной высокого уровня электромагнитной эмиссии в экспериментах с тонким пучком на установке ГОЛ-3. Для антенного механизма автору удалось не только сформулировать аналитическую модель генерации электромагнитных волн, но и подтвердить основные теоретические выводы численными PIC расчётами. Показано, что при определённом соотношении между длиной доминирующей пучковой волны и периодом продольной модуляции плотности плазмы достигается режим, при котором замагниченная плазма становится прозрачной для генерируемых электромагнитных волн на плазменной частоте, что позволяет получать высокую эффективность излучения даже в плазме, размеры которой заметно превышают длину волны излучения.

**В пятой главе** описан новый механизм генерации электромагнитных волн встречными ленгмюровскими волнами с несовпадающими поперечными профилями потенциала. С помощью аналитической теории и численного моделирования методом частиц в ячейках показано, что данный механизм может быть реализован при столкновении в плазме двух коротких лазерных импульсов, оставляющих за собой долгоживущие кильватерные поля. Нелинейное взаимодействие этих полей приводит к генерации когерентного узкополосного

электромагнитного излучения на удвоенной плазменной частоте, которое при соответствующем выборе плотности плазмы может легко перестраиваться по всему терагерцовому диапазону частот. Показано, что при использовании современных мощных лазеров данный механизм позволяет генерировать узкополосные ТГц импульсы с полной энергией десятки мДж и гигаваттной пиковой мощностью. В **заключении** сформулированы основные результаты работы с указанием ссылок на статьи, где они были опубликованы.

В целом диссертация выполнена на высоком научном уровне, логично построена и хорошо структурирована. Тем не менее, к работе имеется и ряд замечаний:

1. В главе 3 отсутствует даже качественное сравнение теории с экспериментом для излучения на плазменной частоте. Относительная интенсивность линий на плазменной и удвоенной частоте могла бы стать дополнительным тестом на адекватность теории.
2. Выводы о высокой эффективности преобразования мощности пучка в мощность излучения в механизме плазменной антенны получены в численных расчётах при весьма специфических условиях, когда электронный пучок инжектируется в плазменный канал с резкими границами и предварительно созданной мелкомасштабной модуляцией плотности. Вызывает вопрос возможность реализации такого канала в лабораторном эксперименте.
3. Насколько применимы результаты, полученные в двумерной модели, к реальной трёхмерной жизни?
4. Численное моделирование столкновения лазерных импульсов в главе 5 даёт представление о генерируемых электромагнитных полях только вблизи источника. Излучением же обычно называют те поля, которые достигли дальней зоны. Нет ли также ошибки в теории, которая вычисляет поток электромагнитной энергии через границу плазмы в непосредственной близости от источника?
5. В тексте встречаются опечатки, а некоторые рисунки содержат кривые с разными цветами, которые не различимы в печатном варианте диссертации.

Данные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы, в которой несомненно сделан важный шаг в развитии теории пучково-плазменного взаимодействия и получены новые результаты, совокупность которых можно классифицировать как научное достижение.

### **Заключение**

Диссертация Тимофеева И.В. на тему «Генерация терагерцового излучения при коллективных взаимодействиях электронных и лазерных пучков с плазмой» является законченной научно-исследовательской работой, выполненной по

актуальной тематике, посвященной теоретическому изучению механизмов генерации электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне частот. Автореферат корректно отражает основное содержание диссертационной работы.

Представленная работа полностью соответствует требованиям пунктов 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Автор – Тимофеев Игорь Валериевич, вне всяких сомнений, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Официальный оппонент

Главный научный сотрудник ИСЭ СО РАН

Отдел высоких плотностей энергии

д.ф-м.н.

10.08.2018

Орешкин Владимир Иванович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес: 634055, г. Томск, пр. Академический, д. 2/3.

Тел.: +7(3822)491-544

e-mail: [contact@hcei.tsc.ru](mailto:contact@hcei.tsc.ru)

Подпись Орешкина В.И. удостоверяю

Директор ИСЭ СО РАН

Академик РАН



Ратахин Н.А.